Henryk BĄKOWSKI, Zbigniew STANIK, Andrzej KUBIK, Robert WIESZAŁA

# PROGNOZOWANIE ZUŻYCIA W SKOJARZENIU ŚLIZGOWYM NA PODSTAWIE ROZKŁADÓW I WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ ZA POMOCĄ MES

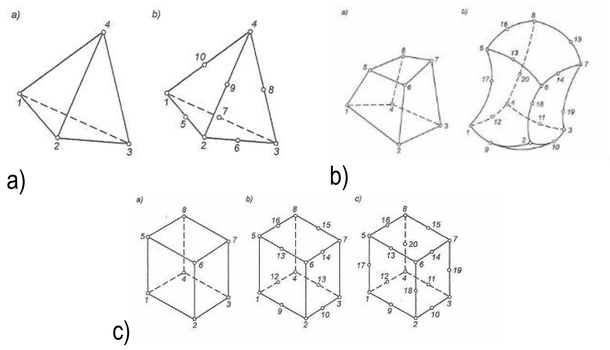
***Streszczenie***

*W artykule omówiony został wpływ wybranych warunków eksploatacji na rozkład i wartości naprężeń i odkształceń oraz na ich głębokość zalegania w warstwie wierzchniej. Występujące na pewnej głębokości maksymalne naprężenia pokrywają się z występującymi pod powierzchnią pęknięciami. Metoda Elementów Skończonych pozwala na określenie miejsc szczególnie narażonych na zużycie.*

## WSTĘP

Metoda elementów skończonych jest zaawansowaną matematyczną metodą obliczeń fizycznych, która polega na zastąpieniu obiektu rzeczywistego (dyskretyzacji obszaru) za pomocą elementów o wymiarach skończonych uśredniających jego stan fizyczny [1]. Element skończony jest prostą figurą geometryczną (jej kształt jest prostszy od kształtu analizowanego obiektu), dla którego wyróżniamy punkty szczególne - tzw. węzły znajdujące się na jego wierzchołkach. Każdy z węzłów posiada pewną liczbę swobody - trzy stopnie swobody w przypadku elementów płaskich i sześć stopni swobody w przypadku elementów bryłowych. Węzły mogą być również umieszczone na bokach i we wnętrzu elementu skończonego (tzw. elementy wyższych rzędów) [1, 2].

Najbardziej pracochłonnym i czasochłonnym etapem analizy MES jest podział obszaru na elementy skończone. Wybór odpowiednich elementów dyskretyzacja obszaru ma istotny wpływ na uzyskanie poprawnych wyników. Elementy przestrzenne (3D) są stosowane w przypadku obiektów objętościowych tzn. wtedy kiedy oprócz samej powierzchni istotna jest również objętość przez którą ta powierzchnia jest ograniczona. Elementy bryłowe dzielą się na przestrzenne czworościenne (typu tetra), sześcienne (typu hexa) i izoparametryczne [2].




***Rys. 1.** Rodzaje elementów skończonych: a) czworościenne (typu tetra), b) sześcienne (typu heksa), c) izoparametryczne [2]*

Siatka typu Tetra jest stosowana przez większość automatów do tworzenia siatek (funkcja automesh'u) zawartych w programach typu CAD. Nie wymaga zbyt dużego nakładu pracy, z jej pomocą łatwiej odwzorować jest geometrie analizowanego modelu. Siatka Hexa jest najbardziej wymagająca zarówno pod względem nakładu pracy użytkownika jak i zaawansowania programów. Znajduje zastosowanie przede wszystkim w przypadku analiz, które z powodu swojego typu dyskwalifikują użycie siatki typu tetra oraz kiedy ważna jest jakość siatki. W większości modeli o skomplikowanej geometrii użycie siatki typu hexa jest nieuzasadnione ekonomicznie. Nie istnieją żadne konkretne reguły, do których można się odnieść wybierając rodzaj elementu skończonego. Pomocną bazą dla uniknięcia błędów symulacji jest szereg artykułów branżowych zawierających pewne doświadczenia użytkowników CAD odnoszących się do konkretnych modeli [4].

Programy do realizacji MES są wysoce wyspecjalizowane i mogą być napisane w różny sposób. Niezależnie jednak od producenta, rodzaju komputera programy te realizują taki sam algorytm postępowania uzyskania danych wyjściowych.

Wyróżniamy następujące etapy rozwiązywania zadania:
- definicja problemu,
- dyskretyzacja obszaru,
- identyfikacja zmiennych,
- sformułowanie problemu,
- wybór układu współrzędnych,
- przyjęcie funkcji aproksymujących,
- wyznaczenie macierzy elementów,
- transformacja układu współrzędnych,
- agregacja macierzy elementów,
- wprowadzenie warunków brzegowych,
- rozwiązanie końcowego układu równań,
- interpretacja wyników [1].

Powyższy ciąg postępowania jest realizowany przez program komputerowy za pomocą następujących modułów:
- preprocesora,
- procesora,
- postprocesora [1].

W wyniku przeprowadzenia testów tribologicznych na stanowisku T-05 w układzie rolka-klocek zaobserwowano w warstwie wierzchniej mikropęknięcie propagujące od powierzchni tarcia w głąb materiału rdzenia (rys. 4).

Przeprowadzono numeryczne badania symulacyjne za pomocą Metody Elementów Skończonych (MES) w celu skorelowania pojawienia się pęknięć w warstwie wierzchniej (zaobserwowane w badaniach metalograficznych) z maksymalnymi naprężeniami występującymi w tym wytężonym obszarze (wyznaczone w badaniach MES).

**Praca została wykonana w ramach BK-244/RT1/2016.**

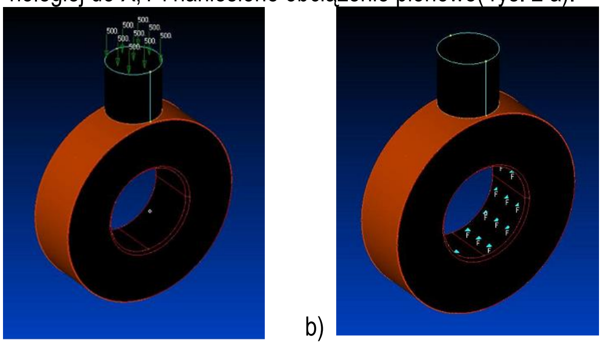
## 1. PRZEBIEG BADAŃ

### 1.1. Warunki brzegowe

Podstawową czynnością przed przeprowadzeniem analizy jest określenie warunków brzegowych. Każda konstrukcja poddawana obciążeniom musi być zamocowana lub osadzona na stabilnym, nieruchomym podłożu. Od sposobu utwierdzenia konstrukcji w dużej mierze zależą naprężenia jakie będą powstawać. Utwierdzenie konstrukcji polega na całkowitym lub częściowym unieruchomieniu wybranych więzów poprzez odebranie odpowiednich stopni swobody.

W analizowanym modelu utwierdzenie zostało usytuowane na dwóch powierzchniach:

- powierzchni otworu rolki (przeciwpróbki) - wszystkie stopnie swobody zostały unieruchomione - odebranie wszystkich sześciu stopni swobody: przemieszczeń w kierunku X, Y, Z oraz obrotów wokół osi równoległej do X, Y, Z (rys. 2 b),
- powierzchni klocka (próbki) - odebranie czterech stopni swobody: przemieszczeń w kierunku X,Y oraz obrotów wokół osi równoległej do X,Y i naniesione obciążenie pionowe( rys. 2 a).



a) b)

*Rys. 2. Model geometryczny skojarzenia rolka-klocek z naniesionymi warunkami brzegowymi: a) obciążenie, b) utwierdzenie*

Współczynnik tarcia został empirycznie wyznaczony z badań tribologicznych na stanowisku T-05.

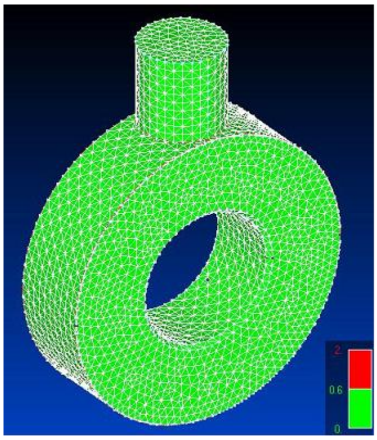
Model został poddany analizie przy następujących wartościach obciążenia i współczynnika tarcia w styku (tab. 1).

*Tab. 1. Zestawienie wybranych parametrów eksploatacyjnych*

| Obciążenie, N | Współczynnik tarcia |
|---|---|
| 500 | 0,1; 0,4; 0,6 |
| 800 | 0,1; 0,4; 0,55 |
| 1000 | 0,1; 0,4; 0,5 |

Podział modelu na elementy skończone czyli dyskretyzacja jego obszaru została przeprowadzona za pomocą funkcji „Automesh". Moduł automatycznej dyskretyzacji nie gwarantuje jednak dokładnych wyników. W celu przeprowadzenia dokładniej analizy wykorzystano funkcję ręcznej edycji parametrów siatki. W ten sposób udało się uzyskać siatkę o większej ilości elementów skończonych i o wartościach jak najbliższych 0,6 (określonych za pomocą współczynnika Jacobianu).

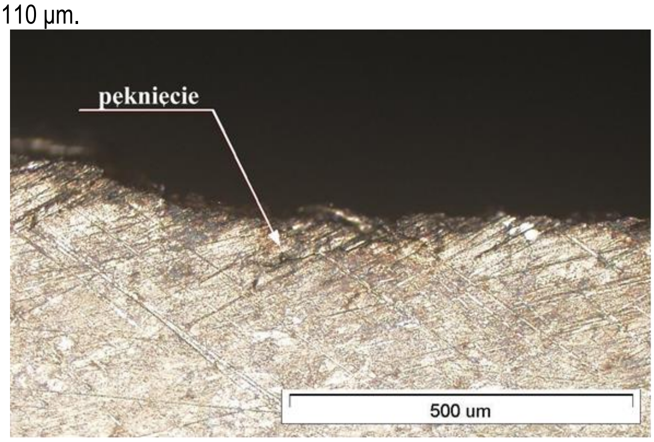
Na rysunku 3 przedstawiono kolory odpowiadające danej wartości współczynnika Jacobianu (zielona, czerwona). Kolor zielony obszaru odpowiada elementowi prawidłowo zaprojektowanego (siatka niezdegenerowana), barwa czerwona dyskwalifikuje model w dalszych obliczeniach (wyniki analizy będą zafałszowane). W analizowanym modelu wszystkie elementy siatki pokryte są barwą zieloną, dlatego można stwierdzić, że w całości nadaje się do obliczeń. Do obliczeń przyjęto stałe materiałowe charakterystyczne dla stali bainitycznej (próbka) oraz dla stali 100Cr6 (przeciwpróbka).



*Rys. 3. Dyskretyzacja modelu skojarzenia ślizgowego*

## 2. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych wyników badań metalograficznych określono głębokość i obszar zalegania największych wartości naprężeń i odkształceń. Wykonując pomiary wyznaczono że głębokość występowania pęknięć dochodzi do ok. 200 µm, w zależności od obciążenia i współczynnika tarcia. Na rysunku 4 przedstawiono zgład metalograficzny z widocznym pęknięciem propagującym ku powierzchni. Głębokość tego pęknięcia wynosi ok. 110 µm.

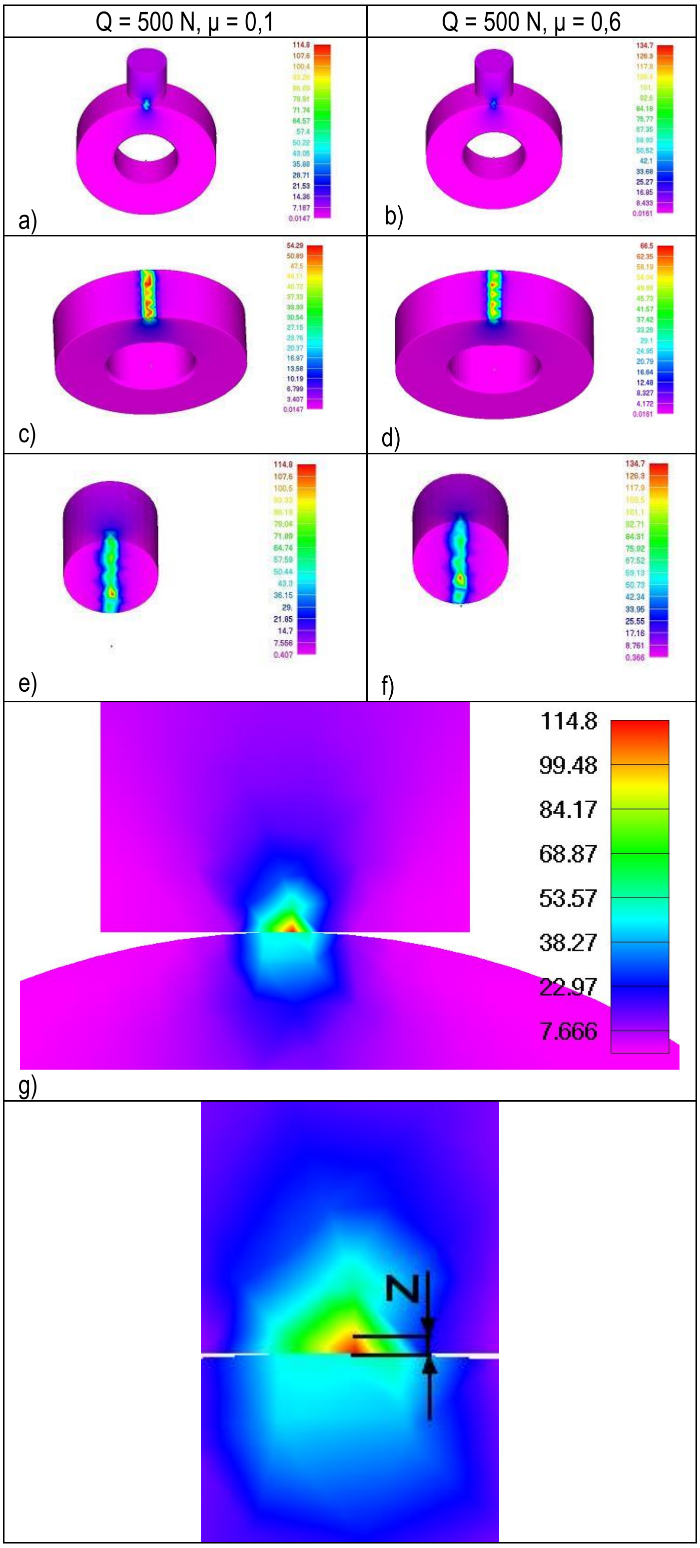



*Rys. 4. Zgład metalograficzny z widocznym pęknięciem w warstwie wierzchniej*

Moduły preprocesora, postprocesora oraz moduł rozwiązujący umożliwiły przeprowadzenie kompletnej analizy modelu. Dane wyjściowe wygenerowane przez postprocesor mają postać graficznych wizualizacji mapy naprężeń (rys. 5). Kompleksowe wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

*Tab. 2. Wyniki analizy skojarzenia rolka- klocek*

| Obciążenie Q, N | Współczynnik tarcia, µ | Maksymalne naprężenie, MPa | Głębokość maksymalnego naprężenia, mm |
|---|---|---|---|
| 500 | 0,1 | 114,8 | 0,11 |
| 500 | 0,25 | 119,8 | 0,15 |
| 500 | 0,4 | 122,1 | 0,17 |
| 500 | 0,6 | 134,7 | 0,18 |
| 800 | 0,1 | 157,9 | 0,09 |
| 800 | 0,4 | 160,7 | 0,10 |
| 800 | 0,45 | 161,8 | 0,15 |
| 800 | 0,55 | 162 | 0,16 |
| 1000 | 0,1 | 190,7 | 0,17 |
| 1000 | 0,25 | 195,4 | 0,17 |
| 1000 | 0,5 | 196,7 | 0,19 |




*Rys. 5. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych wg von Misesa: a), b) analizowane skojarzenie, c), d) przeciwpróbka, e), f) próbka, g) przekrój poprzeczny skojarzenia, g) powiększony fragment styku ślizgowego z naniesionym pomiarem głębokości (z) zalegania maksymalnych naprężeń (110 μm)*

W wyniku przeprowadzonych badań przy użyciu Metody Elementów Skończonych, otrzymano rozkłady i wartości zredukowanych naprężeń wg. von Mises'a a także określono głębokości zalegania maksymalnych naprężeń (rys. 5).

Otrzymane wyniki wskazują, że współczynnik tarcia ma istotny wpływ na wartość i głębokość zalegania maksymalnych naprężeń.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski końcowe:

- głębokość zalegania maksymalnych naprężeń jest ściśle skorelowana z obszarem pojawiających się podpowierzchniowych pęknięć,
- dobór rodzaju, wielkości elementu skończonego ma istotny wpływ na uzyskanie poprawnych wyników, gdyż każda symulacja może być obarczona błędem wynikającym z dyskretyzacji badanego modelu,
- za duże zagęszczenie siatki powoduje wydłużenie czasu obliczeń lub nawet czyni analizę niemożliwą do przeprowadzenia ze względu na zbyt małą moc obliczeniową domowych komputerów PC,
- wraz ze wzrostem obciążenia i współczynnika tarcia wzrastają naprężenia,
- wzrost współczynnika tarcia powoduje powiększania obszaru maksymalnych naprężeń, co może prowadzić do pojawiania się zużycia quasi-statycznego (ścierne, adhezyjne itp.).

## BIBLIOGRAFIA


1. Osiński J.: *Obliczenia wytrzymałościowe elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
2. Wang E., Nelson T., Rauch R..: *Back to Elements- Tetrahedra vs. Hexahedra*. CAD-FEM GmbH, Munich- Germany, 2004.
3. Bąkowski H.: *Computer aided analysis of wear of the surface layer with a pearlitic structure using an amsler stand*. Tribologia 2015 r. 46 nr 6, s. 9-19.


# PREDICTION OF WEAR IN SLIDING CONTACT ON THE BASIS OF DISTRIBUTIONS AND VALUES OF STRESSES BY MEANS OF FEM


***Abstract***

*The article presented the impact of the selected operating conditions for distribution and values of stresses and on their depth at the surface layer. Occurring at a depth of maximum stresses coincide with the common under the surface of cracks in real object. Finite Element Method allows for determination of places particularly exposed to wear.*



Autorzy:

dr inż. **Henryk Bąkowski** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, henryk.bakowski@polsl.pl

dr hab. inż. **Zbigniew Stanik** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, zbigniew.stanik@polsl.pl

mgr inż. **Andrzej Kubik** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych andrzej.kubik@polsl.pl

dr inż. **Robert Wieszała**– Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, robert.wieszala@polsl.pl